

# 가변 스텝 사이즈를 적용한 P&O 방식 기반의 고효율 MPPT 알고리즘 연구

김봉석<sup>1</sup>, 정가준<sup>2</sup>, 심우식<sup>2</sup>, 조종민<sup>2</sup>, 차한주<sup>†</sup>

## A Study on High-Efficiency MPPT Algorithm Based on P&O Method with Variable Step Size

Bongsuck Kim<sup>1</sup>, Jiajun Ding<sup>2</sup>, Woosik Sim<sup>2</sup>, Jongmin Jo<sup>2</sup>, and Hanju Cha<sup>†</sup>

### Abstract

In this study, a maximum power point tracking (MPPT) algorithm based on the perturb and observe (P&O) method with variable step size is proposed to improve the dynamic response characteristic of MPPT, using the existing P&O method. The proposed algorithm, which we verified by simulation and experiment, can track the maximum power point (MPP) through duty control and consisted of three operation modes, namely, constant voltage mode, fast mode, and variable step mode. When the insolation is constant, the voltage variation of the operating point at the MPP is reduced through the step size reduction of the duty in the variable step mode. Consequently, the vibration of the operating point is reduced, and the power generation efficiency is increased. When the insolation changes, the duty and the photovoltaic (PV) voltage are kept constant through the constant voltage mode. The operating point then rapidly tracks the new MPP through the fast-mode operation at the end of the insolation change. When the MPP is reached, the operation is changed to the variable step mode to reduce the duty step size and track the MPP. The validity of the proposed algorithm is verified by simulation and experiment of a PV system composed of a PV panel and a boost converter.

**Key words:** Maximum power point tracking, PV system, P&O method, Duty control, Variable step

### 1. 서 론

태양광 발전은 청결하고 효율적인 특성으로 인 해 널리 연구되고 있으며 태양광 발전 시스템에서 PV (photovoltaic) 모듈의 특성 곡선은 일사량 및 온도와 관련이 있다. PV 시스템이 동작할 때, 동작점은 PV 모듈의 특성 곡선을 따라 이동하며 PV 모듈의 출력이 최대 값에 도달하면 이 점을 최대 전력점(maximum power

point: MPP) 이라고 한다. PV 모듈의 출력은 환경의 일사량과 온도의 변화에 따라 변할 수 있기 때문에 최대 전력점 추종(maximum power point tracking: MPPT)을 통해 PV 시스템을 실시간으로 제어하여 최대 전력을 유지할 필요가 있다.

최근 몇 년 동안 연구자들은 MPPT 기술에 대한 연구를 많이 하였으며 다양한 MPPT 알고리즘을 개발하였다. 가장 보편적인 MPPT 방식은 P&O(perturb and observe) 방식 및 INC(incremental conductance) 방식이 있다<sup>[1]</sup>. P&O 방식은 간단한 구조를 갖고 있으며 PV 모듈의 전압을 변경시켜 출력 전력을 변경하여 다른 전압에서 출력 전력을 비교하여 최대 전력의 동작점 전압을 결정한다. INC 방식은 PV 모듈의 전압변동을 통해 PV 시스템의 동작점을 PV 모듈의 특성 곡선을 따라 이동시키며, 동작점의 기울기가 0일 때 동작점이 최대 전력점에 도달한다. INC 방식은 P&O 보다 복잡하며 계산량이 많다. 다른 MPPT 방식은 LA(linear approximation) 방식 및 FOCV(fractional open-circuit voltage) 방식이 있

Paper number: TKPE-2019-24-1-1

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

<sup>†</sup> Corresponding author: hjcha@cnu.ac.kr, Dept. of Electrical Engineering, Chungnam National University  
Tel: +82-42-821-7006 Fax: +82-42-821-8895

<sup>1</sup> Korea Electric Power Research Institute

<sup>2</sup> Dept. of Electrical Engineering, Chungnam National University

Manuscript received Aug. 21, 2018; revised Sep. 12, 2018; accepted Oct. 2, 2018

— 본 논문은 2018 전력전자학술대회 태양광논문상 수상논문임

— 본 논문은 2018 전력전자학술대회 우수논문상 수상논문임

다<sup>[2],[3]</sup>. LA 방식은 일사량이나 온도의 변화에 따른 최대 전력점들을 한 직선으로 근사화한 후 관측된 전력을 선형화된 직선에 대입하여 최대 전력점을 추종하는 방식이며 일사량이나 온도가 변할 때 최대 전력점을 신속히 추종할 수 있는 장점을 가지고 있다. FOCV 방식은 PV 모듈의 개방 회로 전압과 최대 전력점 전압 사이의 관계를 이용하여 전력 변환기의 듀티 제어를 통해 최대 전력점을 추종하는 방식이며, 알고리즘 구현에 요구되는 계산량이 적고 쉽게 구현할 수 있는 장점을 갖으나, 최대 전력점 추종의 정확도가 떨어져 효율 감소에 대한 단점이 있다. PV 시스템에 적용되는 MPPT 기법은 PV 모듈의 출력특성 변화에 기인하는 외부 환경요인들의 영향에 대하여 적응성을 갖춰야 한다. 일사량 또는 온도와 같은 주변 환경요소들의 변화는 PV 모듈의 기준 출력특성인 일사량  $1000\text{W}/\text{m}^2$ , 온도  $25^\circ\text{C}$ 의 STC(standard test condition) 조건에서 정의된 P-V 또는 I-V 특성곡선 변화에 영향이 존재하며, 이는 MPPT가 추종해야 하는 최대 출력점의 변화를 야기시키는 직접적인 원인으로 작용한다<sup>[4],[5]</sup>. 따라서 PV 시스템은 외부 요인에 의한 PV 모듈의 최대 출력점이 변하는 조건 하에서도 변화된 PV 특성곡선의 최대 전력점을 빠르게 추종할 뿐만 아니라 정상상태 효율 향상의 성능을 갖는 MPPT 알고리즘을 갖춰야 할 필요성이 요구된다<sup>[6],[7]</sup>. 앞서 설명한 기존 MPPT 방식들은 최대 전력점에 도달하기 위해 고정된 듀티 스텝 사이즈를 인가하기 때문에 추종속도와 정상상태 효율 간에 트레이드오프(trade-off)가 존재한다. 듀티 스텝 사이즈가 크면 최대 전력점에 도달하는 추종속도가 빠르지만 동작점이 최대 전력점에서 진동이 커짐에 따라 정상상태 효율이 낮다. 반면에 듀티 스텝 사이즈가 작은 경우 추종속도는 느리지만 최대 전력점에서 동작점의 진동이 작아 정상상태 효율이 높아진다. 이와 같은 단점을 보완하기 위해 두 개의 스텝 사이즈를 사용하여 최대 전력점에서 동작점이 멀리 있을 때는 큰 듀티 스텝 사이즈로 동작하고, 동작점이 최대 전력점에 가까워지면 작은 듀티 스텝 사이즈로 동작하는 기법<sup>[8],[9]</sup>이 연구되었다. 2개의 스텝 사이즈를 이용하는 방식은 큰 듀티 스텝을 작은 듀티 스텝 사이즈로의 전환하는 과정이 어느 시점에 이루어지는지에 따라 최대 출력점의 정상상태 도달 시간이 달라질 수 있다. 또한, 추종속도와 정상상태 효율을 고려하기 위해 PV 모듈의 특성 곡선이나 MPPT의 동작 특성에 의해 스텝 사이즈를 자동으로 감소하는 알고리즘<sup>[10],[11]</sup>이 연구되었으며, 이 방식은 MPPT 알고리즘 구현에 있어  $dP/dV$ 를 이용한 미분기 특성으로 인해 노이즈의 발생 영향이 존재하는 취약점을 안고 있다.

본 논문에서는 외부 환경 변화에 따른 특성곡선 변화시 추종속도 및 정상상태 효율 향상을 위해 가변 스텝 사이즈를 적용한 P&O 방식 기반의 개선된 MPPT 기법을 제안하였다. 제안된 MPPT 알고리즘에서 추종속도의

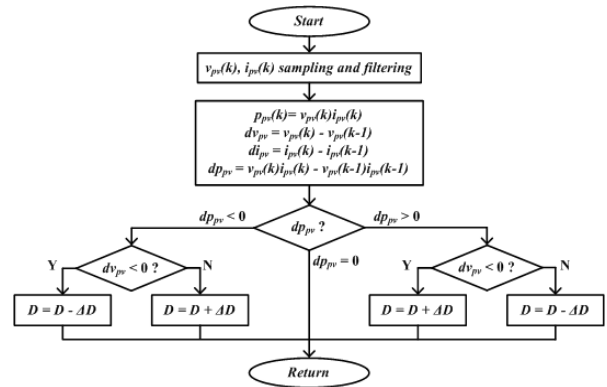


Fig. 1. Flowchart of MPPT algorithm using P&O method.

향상은 일사량의 증가 또는 감소 조건이 발생한 시점에서 듀티 변화량을 0으로 설정함으로써 전압변동 없이 새로운 특성곡선에서도 동일한 전압지점에 동작점을 위치시키는 정전압 모드 함께 큰 듀티 스텝 사이즈를 통해 최대 전력점으로 동작점을 빠르게 이동시키는 고속 모드를 통해 이뤄진다. 또한, 최대 전력점 부근에 도달하면 듀티 스텝 사이즈를 일정 비율로 감소시키는 가변 스텝 모드로 동작하여 최대 전력점 지점에서 발생하는 진동의 크기를 감소함으로써 PV 출력특성을 고효율화하는 장점을 갖는다.

본 논문은 2장에서 일반적인 MPPT 방식을 비교하고 3장에서 제안하는 P&O 기반의 고효율 MPPT 알고리즘을 설명하였으며, 4장에서는 시뮬레이션 및 실험을 통해 제안하는 MPPT 알고리즘의 타당성을 검증하였다.

## 2. 일반적인 MPPT 방식

### 2.1 P&O(perturb and observe) 방식

P&O 방식은 PV 모델의 출력 전압을 주기적으로 증가, 감소시킴으로써 이전의 출력 전력과 현재의 출력 전력을 비교하여 최대 전력점을 찾는 방법이다. P&O 방식은 제어기가 간단하고 빠른 응답을 가지는 장점이 있지만, 최대 전력점에서 동작점이 PV 출력 전압의 연속적인 미소 변화로 인해 진동하여 PV 출력 전력의 손실을 발생하는 단점을 가지고 있다. 또한, 일사량이 급격하게 변하는 경우 PV 모델의 특성 곡선 변화로 인해 정상적인 MPPT 제어가 어렵다는 단점도 가지고 있다. 그림 1은 P&O 방식을 사용한 MPPT의 알고리즘 흐름도를 나타낸다.

그림 1에서  $v_{pv}(k)$ ,  $i_{pv}(k)$ ,  $p_{pv}(k)$ 는 현재 측정된 PV 전압, PV 전류 및 PV 전력을 나타내며,  $v_{pv}(k-1)$ ,  $i_{pv}(k-1)$ ,  $p_{pv}(k-1)$ 는 이전 주기에 측정된 값이다.  $dp_{pv}$ 는  $p_{pv}(k) - p_{pv}(k-1)$ 로 표현된 PV 전력 변화량이고,  $dv_{pv}$ 는  $v_{pv}(k) - v_{pv}(k-1)$ 로써 PV 전압의 변화량을 나타낸다.  $\Delta D$ 는 고정 듀티 변화량으로써 P&O 방식에 의한  $\Delta D$ 의 증감에 따라 부스트 컨버터에 인가되는 최종 듀티  $D$ 가 결정된다.

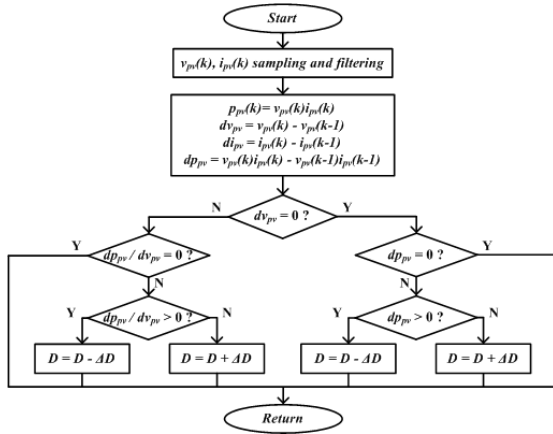


Fig. 2. Flowchart of MPPT algorithm using INC method.

### 2.2 INC(incremental conductance) 방식

INC 방식은 측정된 PV 전압과 전류를 통해 PV 모듈의 출력 전력을 계산하고, 출력 전력의 변화량과 전압의 변화량에 따라 동작점을 이동시키며 최대 전력점을 추종하는 제어방법이다. 최대 전력점에서는 P-V 특성 곡선의 기울기인  $dp_{pv}/dv_{pv}$ 가 0이라는 특성을 가지고 있다. 그림 2는 INC 방식의 알고리즘을 나타내며 INC 방식은 최대 전력점 도달 시 PV 모듈의 출력이 안정된다는 장점이 있다. 그러나 미분 연산을 수행해야 하기 때문에 계산량이 비교적 많고 연산 수행이 가능한 프로세서가 필요하다. 또한 나누기 연산에서 분모는 0이 될 수 없으므로 전압 증분 값 연산 시 제한 값을 설정해주어야 하며 알고리즘 구조가 복잡하다. 그림 2에서  $v_{pv}(k)$ ,  $i_{pv}(k)$ ,  $p_{pv}(k)$ 는 현재 측정된 PV 전압, PV 전류 및 PV 전력을 나타내며,  $v_{pv}(k-1)$ ,  $i_{pv}(k-1)$ ,  $p_{pv}(k-1)$ 는 이전 주기에 측정된 값이다.  $dp_{pv}$ 와  $dv_{pv}$ 는 각각 PV 전력과 PV 전압의 변화량이며,  $\Delta D$ 는 고정 듀티 변화량으로써 P&O 방식에 의한  $\Delta D$ 의 증감에 따라 부스트 컨버터에 인가되는 최종 듀티  $D$ 가 결정된다.

## 3. 고효율 MPPT 알고리즘 개발

### 3.1 듀티 제어 알고리즘

본 논문에서 제안된 가변 스텝 사이즈를 적용한 P&O 방식 기반의 MPPT 알고리즘은 듀티 제어를 통해 전압을 변경하여 PV 모듈의 최대 출력 전력을 추종한다<sup>[12]</sup>. 제안된 알고리즘은 3가지 동작 모드로써 정전압 모드, 고속모드와 가변 스텝 모드로 구성되며, 흐름도는 그림 3과 같다<sup>[13]</sup>.

본 논문에서 사용한 PV 시스템에서 DC-DC 부스트 컨버터의 듀티는 식 (1)과 같이 계산될 수 있으며 듀티의 스텝 사이즈를 파악하기 위해 식 (2)와 같이 듀티 스텝 사이즈와 전압 스텝 사이즈의 관계를 유도할 수 있다. 식 (2)에 따라 적절한 전압 스텝 사이즈에 의해 적절한 듀티 스텝 사이즈를 선정할 수 있다.

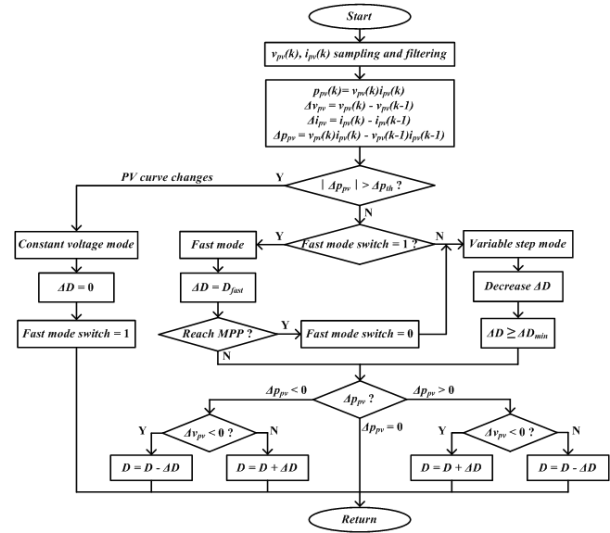


Fig. 3. Flowchart of the proposed MPPT algorithm.

$$D = 1 - \frac{V_{PV}}{V_{Load}} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \Delta D &= D(k) - D(k-1) \\ &= \left[ 1 - \frac{V_{PV}(k)}{V_{Load}} \right] - \left[ 1 - \frac{V_{PV}(k-1)}{V_{Load}} \right] \\ &= - \frac{V_{PV}(k) - V_{PV}(k-1)}{V_{Load}} \\ &= - \frac{\Delta V_{PV}}{V_{Load}} \end{aligned} \quad (2)$$

그림 3의 알고리즘에 따라 전력의 변화량이 임계 값  $dp_{th}$ 보다 크면 일사량이나 온도가 변하는 것을 간주할 수 있으며 PV 특성 곡선이 일사량이나 온도의 변화에 따라 변동된다. MPPT 동작은 정전압 모드로 변경되고 듀티와 PV 전압이 일정하게 유지된다.

일사량이나 온도의 변화가 끝나면 전력의 변화량이 작아지고 MPPT 동작은 정전압 모드에서 고속모드로 전환하여 큰 스텝을 사용해 새로운 최대 전력점에 빨리 추종한다. 최대 전력점에 도달하면 가변 스텝 모드로 전환하고 스텝 사이즈가 자동으로 감소하며 최대 전력점에서의 진동이 감소되고 PV 시스템의 효율이 향상된다. 고속모드와 가변 스텝 모드에서 스텝 사이즈를 결정할 후 P&O 듀티 제어를 통해 전압을 변경하여 PV 모듈의 최대 출력 전력을 추종한다.

### 3.2 정전압 모드 및 고속모드

제안된 알고리즘에서 MPPT가 초기 시작점에서 동작할 때 또는 고속모드의 트리거 조건이 1이 될 때에는 고속모드에서 동작한다. 고속모드에서 듀티의 스텝 사이즈는 큰 고정 값인  $D_{fast}$ 이며 최대 전력점에 빠르게 도달할 수 있다. 임계 값  $dp_{th}$ 를 먼저 설정하며 전압변동

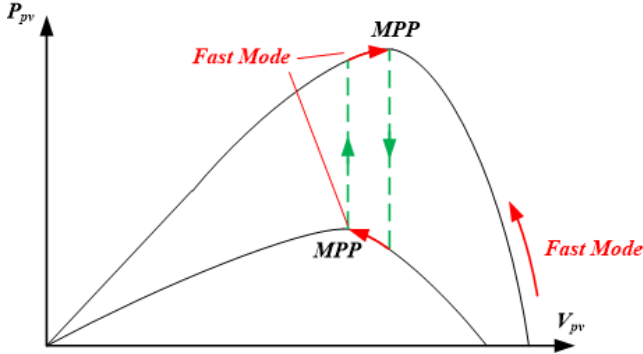


Fig. 4. Variation of characteristic curve of PV module and fast mode operation.

으로 인한 전력변동의 값이 임계값 보다 크면 일사량이나 온도가 변경되고 PV 모듈의 특성 곡선이 변동된 것으로 간주된다. 그림 4는 일사량 변화에 따른 PV 모듈의 특성곡선의 변동을 보여주는 것으로 제안된 MPPT 알고리즘은 일사량 변화가 발생하는 시점에서 듀티 스텝 변화량을 0으로 설정하는 정전압 모드로 전환하여 PV 전압을 일정하게 유지하고 고속모드의 트리거 조건이 1로 변경된다. 따라서 PV 동작점은 기존 특성곡선에서 새로운 특성곡선에 수직으로 이동하여 동일한 전압 지점에 위치하고, 일사량 변화가 끝나 후 측정된 전력 변화량이 임계값보다 작아지면 큰 듀티 스텝 사이즈를 갖는 고속모드로 전환하여 새로운 최대 전력점을 빠르게 추종한다.

### 3.3 가변 스텝 모드

가변 스텝 모드는 동작점이 최대 전력점에서 멀리 있을 때 큰 스텝 사이즈를 사용하여 최대 전력점에 도달하는 시간을 줄이고, 동작점이 최대 전력점에 가까울 때 작은 스텝 사이즈를 사용하여 진동을 줄이고 효율을 향상시킨다. 고속모드에서 움직이던 동작점이 최대 전력점에 도달하면 가변 스텝 모드로 전환한다. 가변 스텝 모드에서 듀티의 스텝 사이즈는 고속모드의 큰 스텝  $D_{fast}$  부터 감소하기 시작하고 설정된 최소 값  $\Delta D_{min}$ 까지 감소한다. 가변 스텝 모드에서 스텝 사이즈의 조정은 계산된 전력 차의 부호와 관련이 있으며  $sign$  함수를 사용하여 식 (3)과 같다. 전력 차가 0보다 작으면  $sign$ 는 -1이 되고, 전력 차가 0보다 크면  $sign$ 는 +1이 된다.

$$M = sign[dp_{pv}(k)] + sign[dp_{pv}(k-1)] \quad (3)$$

그림 5는 MPPT 동작에 따른  $M$ 의 가능한 케이스이다. 그림 5(a)에서 계산된 전력은 2번 연속 증가하며  $sign[dp_{pv}(k)]$ 와  $sign[dp_{pv}(k-1)]$ 는 모두 1이며 동작점은 최대 전력점으로 이동한다. 그림 5(b)에서 PV 전력은 증가한 후 감소하며  $sign[dp_{pv}(k-1)]$ 이 1이고

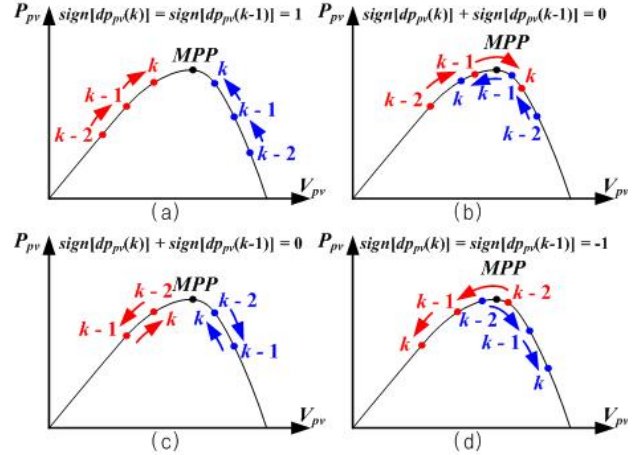


Fig. 5. Possible cases of  $M$  according to MPPT operation.

$sign[dp_{pv}(k)]$ 가 -1이며 동작점이 최대 전력점을 지나간다. 그림 5(c)에서 PV 전력은 감소한 후 증가하며  $sign[dp_{pv}(k-1)]$ 이 -1이고  $sign[dp_{pv}(k)]$ 가 1이다. 그림 5(d)에서 PV 전력은 2번 연속 감소하며  $sign[dp_{pv}(k)]$ 와  $sign[dp_{pv}(k-1)]$ 은 모두 -1이며, 동작점이 최대 전력점의 반대 방향으로 이동한다. 그림 5에 따라  $M$ 의 절대 값은 0 또는 2임을 알 수 있으며, 듀티의 스텝 사이즈는 식 (4)와 같이 변한다. 식 (4)에 의해 그림 5(b)와 (c)의 경우 때마다  $|M|$ 는 0이고 듀티의 스텝 사이즈는  $\Delta D_{min}$ 까지  $m_1$ 의 비례로 감소하며,  $m_1$ 은 스텝을 줄이기 위한 비례 계수이며 0부터 1까지의 범위에서 설정될 수 있다. 그림 5(a)와 (d)의 경우 때마다  $|M|$ 는 2이고 듀티 스텝 사이즈는 동일하게 유지된다.

$$\begin{aligned} \text{If } (|M|=0) \\ \Delta D(k) &= m_1 \cdot \Delta D(k-1), m_1 \in (0, 1) \\ \text{If } (|M|=2) \\ \Delta D(k) &= \Delta D(k-1) \end{aligned} \quad (4)$$

제안된 MPPT 알고리즘은 일사량이 변할 때 정전압 모드에서 동작하고 PV 전압은 변하지 않고, 일사량 변화가 끝난 후 변동된 PV 특성 곡선에서 고속모드를 통해 최대 전력점에 도달하는 시간이 감소된다. 최대 전력점에 도달하면 동작 모드는 가변 스텝 모드로 전환되며 최대 전력점에서의 진동이 감소되고 PV 시스템의 효율이 향상된다.

## 4. 시뮬레이션 및 실험 결과

### 4.1 시뮬레이션 결과

그림 6은 PV 시스템의 시뮬레이션 회로로 PV 패널, DC링크 커패시터, 부스트 컨버터 및 부하로 구성된다.

그림 7은 일사량  $1000\text{W/m}^2$ , 온도  $25^\circ\text{C}$ 의 STC 조건

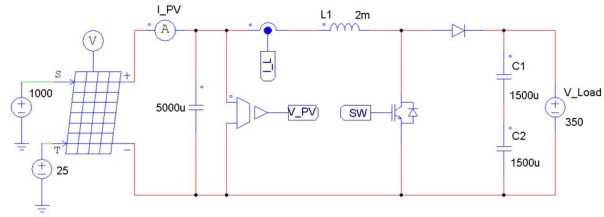


Fig. 6. Simulation circuit of PV system.

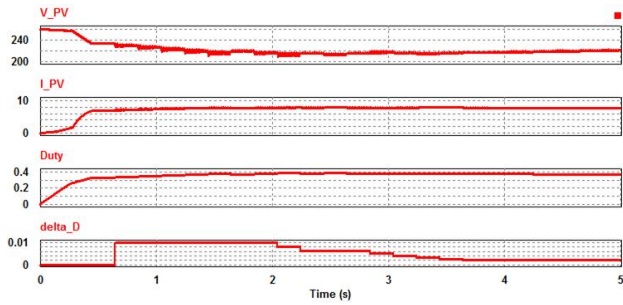
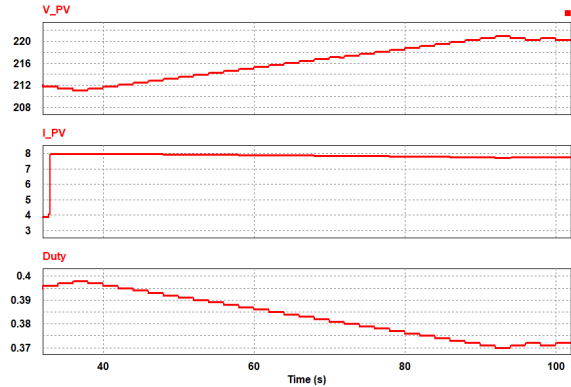


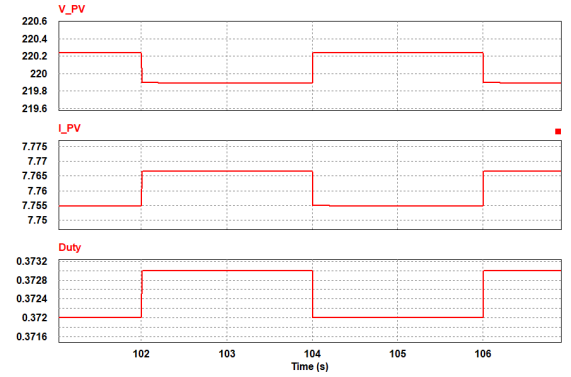
Fig. 7. Simulation result when MPPT is operating from initial starting point.

에서 PV 동작점이 초기 시작점에서 동작할 때의 시뮬레이션 결과로 소프트 스타트 구간을 거쳐 최대 전력점을 빠르게 추종하기 위해 듀티 스텝 사이즈  $\Delta D$ 가  $D_{fast}$ 인 고속모드 동작하며, 최대 전력점 지점에서 가변 스텝 모드로 전환하여 듀티 스텝 사이즈가 최솟값인  $\Delta D_{min}$ 로 감소하는 것을 확인할 수 있다.

그림 8과 그림 9는 일사량이  $500W/m^2$ 에서  $1000W/m^2$ 으로 증가할 때, 최대 전력점 추종을 위한 기존 방식과 제안된 방식의 시뮬레이션 비교 파형으로 MPPT 주기는 2초로 설정하였다. 그림 8은 기존 MPPT 기법의 시뮬레이션 파형으로 그림 8(a)는 일사량  $500W/m^2$ 의 최대 전력점인 212V 지점에서 일사량  $1000W/m^2$ 의 최대 전력점 220V로 PV 동작점이 이동하는 과도 상태 구간을 보여주고 있으며, 추종 시간은 67초이다. 그림 8(b)는 일사량  $1000W/m^2$ 의 최대 전력점에서 정상상태 파형으로 PV 전압 변동 폭은 0.35V, PV 전류 변동 폭은 11.74mA이다. 그림 9는 제안된 가변 스텝 사이즈 기반의 MPPT 방식 결과 파형이다. 그림 9(a)는 과도상태 구간으로써 일사량 변화 시 듀티 스텝  $\Delta D$ 를 0으로 변경하여 새로운 특성곡선에서 동일한 PV 전압 동작점으로 유지 후 고속모드의 듀티 스텝  $D_{fast}$ 를 통해 최대 전력점 방향으로 빠르게 이동한다. 최대 전력점 부근에서 가변 스텝 모드로 전환하여 듀티 스텝을 MPPT 매 주기마다 지속적으로 감소시켜 최솟값  $\Delta D_{min}$ 으로 동작함에 따라 제안된 알고리즘이 정상적으로 동작함을 확인할 수 있으며, 추종 시간은 28초이다. 또한 그림 9(b)에서 보이는 바와 같이 일사량  $1000W/m^2$ 의 최대 전력점에서 PV 전압 변동 폭은 0.1V, PV 전류 변동 폭은 3.36mA이다. 시뮬레이션 결과 파형으로부터 일사량 증가 조건에서 제안된 MPPT 기법은 기존 방식보다 추종

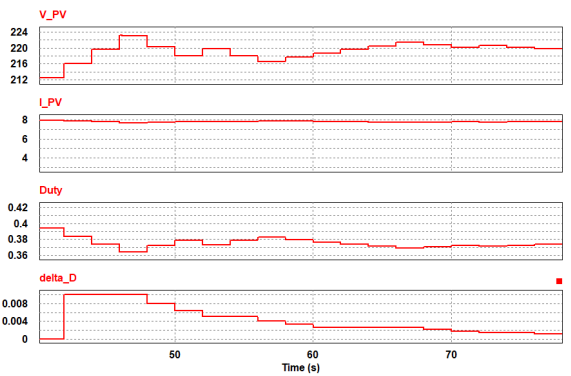


(a) Transient state

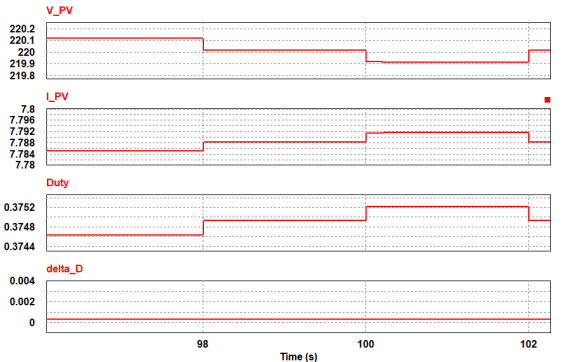


(b) Steady state

Fig. 8. Simulation results of conventional MPPT method when solar irradiance increases.



(a) Transient state



(b) Steady state

Fig. 9. Simulation results of proposed MPPT method when solar irradiance increases.



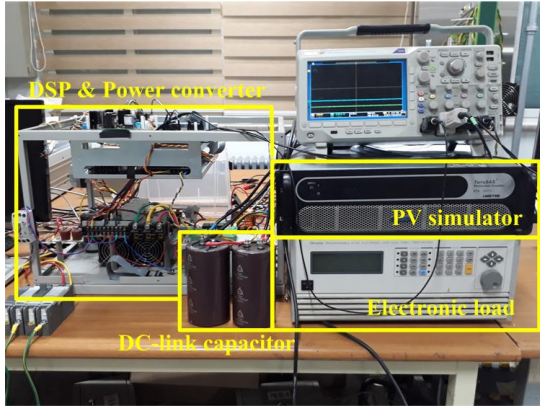


Fig. 10. Configuration of experimental equipment.

TABLE 1  
PV SIMULATOR PARAMETERS

Parameter	Symbol	Value (1000W/m <sup>2</sup> , 25°C)	Value (500W/m <sup>2</sup> , 25°C)
Open-circuit voltage	$V_{oc}$	260.00 [V]	250.67 [V]
Short-circuit current	$I_{sc}$	8.21 [A]	4.1 [A]
MPP voltage	$V_{mpp}$	220.61 [V]	212.04 [V]
MPP current	$I_{mpp}$	7.72 [A]	3.86 [A]
MPP power	$P_{mpp}$	1702.9 [W]	818.83 [W]

TABLE II  
BOOST CONVERTER PARAMETERS

Parameter	Symbol	Value
Load voltage	$V_{load}$	350 [V]
DC link capacitor	$C_{in}$	5000 [uF]
Inductor	$L$	2 [mH]
Switching frequency	$f_{sw}$	10 [kHz]

속도가 빠르고, 최대 전력점 지점의 정상상태 구간에서 PV 전압 및 전류 변동 폭이 약 3.5배 작아짐에 따라 MPPT 추종특성이 향상됨을 검증하였다.

#### 4.2 실험 결과

그림 10은 제안된 MPPT 알고리즘 특성을 검증하기 위한 실험 구성을 보여주는 것으로 PV 시뮬레이터, 부스트 컨버터 및 전자부하로 구성된다. 표 1은 PV 시뮬레이터 파라미터 조건을 나타내는 것으로 일사량이 각각 1000W/m<sup>2</sup>와 500W/m<sup>2</sup> 조건에 대한 값을 보여주며, 표 2는 부스트 컨버터 파라미터를 나타낸다.

그림 11은 제안된 MPPT 기법의 초기 시작점에서 동작할 때의 실험 결과이다. 듀티의 스텝  $\Delta D$ 가  $D_{fast}$ 부터 최솟값  $\Delta D_{min}$ 로 감소하며, MPPT가 고속모드에서 동작하기 시작하고 동작점이 최대 전력점에 도달하면 가변 스텝 모드로 전환하는 것을 확인할 수 있다.

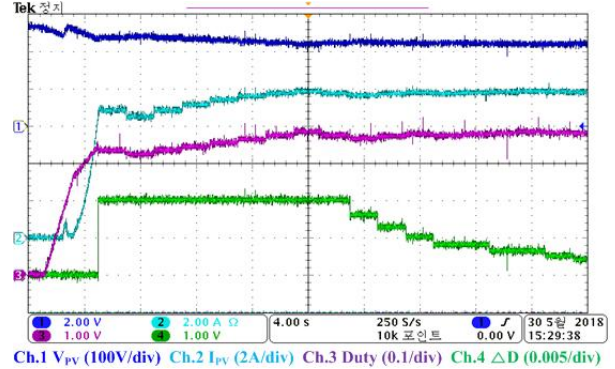


Fig. 11. Experimental results when MPPT is operating from initial starting point.

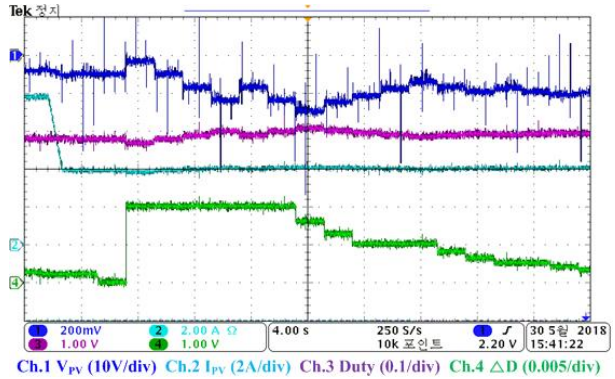


Fig. 12. Experimental results when solar irradiance decreases.

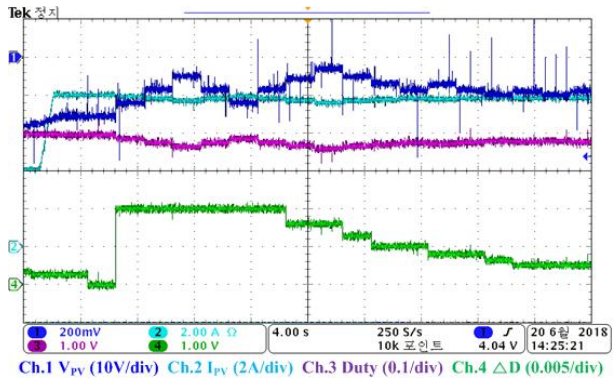


Fig. 13. Experimental results when solar irradiance increases.

그림 12는 일사량이 1000W/m<sup>2</sup>에서 500W/m<sup>2</sup>로 감소될 때 제안된 MPPT 기법의 실험 결과이다. 일사량의 감소에 따라 PV 전류가 감소하여  $\Delta D$ 가 0으로 변하고  $D_{fast}$ 로 전환한 후 일정 비율로 감소하는 것을 알 수 있다. 제안된 알고리즘에 따라 일사량이 감소된 후 듀티와 PV 전압이 정전압 모드에서 일정하게 유지되며, MPPT가 고속모드로 전환한 다음에 가변 스텝 모드로 전환하는 것을 확인하였다. 그림 13은 일사량이 500W/m<sup>2</sup>에서 1000W/m<sup>2</sup>로 증가될 때 MPPT의 실험 결과이다. 일사량의 증가에 따라 PV 전류가 증가하며, 듀티 스텝  $\Delta D$ 의 변화 및 MPPT 동작 모드의 전환이 정상적으로 동작하고 있으며, 제안된 MPPT 알고리즘의 타당성을 검증하였다.

## 5. 결 론

본 논문은 PV 시스템의 MPPT 효율을 향상시키기 위해 가변 스텝 사이즈를 적용한 P&O 방식 기반의 MPPT 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘에 따라 일사량이 일정한 경우, 가변 스텝 모드에서 듀티의 스텝 사이즈 감소를 통해 최대 전력점에서 동작점의 진동이 감소하여 효율이 증가하며 일사량이 변동한 경우, 정전압 모드에서 듀티와 PV 전압은 일정하게 유지한 다음에 고속모드 동작을 통해 빠르게 최대 전력점으로 추종한다. 최대 전력점에 도달하면 가변 스텝 모드로 변경하여 듀티 스텝 사이즈를 다시 감소시킨다. 시뮬레이션 및 실험을 통해 MPPT 동작 모드의 전환과 듀티 스텝 사이즈의 변화를 확인하였으며 제안된 알고리즘을 검증하였다.

이 논문은 한국전력공사 지원에 의하여 전력연구원의 주관으로 수행된 과제(R16EA09)의 연구 결과입니다.

## References

- [1] S. B. Kim, Y. M. Jo, J. Y. Choi, S. H. Song, I. Choy, and Y. K. Lee, "A novel hybrid MPPT control for photovoltaic system," *KIPE 2014 Power Electronics Autumn Conference*, pp. 7-8, Nov. 2014.
- [2] P. C. Chou and H. Chen, "An adaptive, linear-line approximation method and its VLSI implementation for maximum power control of photovoltaic system," *2012 IEEE 13th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL)*, pp. 1-5, Jun. 2012.
- [3] J. J. Schoeman and J. D. van Wyk, "A simplified maximal power controller for terrestrial photovoltaic panel arrays," *1982 IEEE Power Electronics Specialists conf.*, pp. 361-367, Jun. 1982.
- [4] H. Park and H. Kim, "Analysis on electrical characteristics of PV cells considering ambient temperature and irradiance level," *The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 21, No. 6, pp. 481-485, Nov. 2016.
- [5] J. S. Choi, J. S. Ko, and D. H. Chung, "Optimal current detect MPPT control of PV system for robust with environment changing," *Journal of the Korean Inst. Illum. Electr. Install. Eng.*, Vol. 25, No. 10, pp. 47-58, Oct. 2011.
- [6] Y. Shi, R. Li, Y. Xue, and H. Li, "High-frequency link-based grid-tied PV system with small DC-link capacitor and low-frequency ripple-free maximum power point tracking," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 31, No. 1, pp. 328-339, Jan. 2016.
- [7] A. Pandey, N. Dasgupta, and A. K. Mukerjee, "High-performance algorithms for drift avoidance and fast tracking in solar MPPT system," *IEEE Trans. Energy Convers.*, Vol. 23, No. 2, pp. 681-689, Jun. 2008.
- [8] J. S. Choi, J. S. Ko, and D. H. Chung, "Development of VPO MPPT of PV system considering shadow influence," *The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 16, No. 5, pp. 521-531, Oct. 2011.
- [9] M. Killi and S. Samanta, "An adaptive voltage-sensor-based MPPT for photovoltaic systems with SEPIC converter including steady-state and drift analysis," *IEEE Trans. Ind Electron.*, Vol. 62, No. 12, pp. 7609-7619, Dec. 2015.
- [10] F. Liu, S. Duan, F. Liu, B. Liu, and Y. Kang, "A variable step size INC MPPT method for PV systems," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 55, No. 7, pp. 2622-2628, Jul. 2008.
- [11] C. C. Hua, Y. H. Fang, and W. T. Chen, "Hybrid maximum power point tracking method with variable step size for photovoltaic systems," *IET Renew. Power Gen.*, Vol. 10, No. 2, pp. 127-132, Feb. 2016.
- [12] J. Lee, J. Jo, D. Yun, and H. Cha, "Comparison of duty control and current control method for photovoltaic MPPT application," *2017 KIPE Power Electronics Annual Conference*, pp. 298-299, Jul. 2017.
- [13] J. Ding, J. Jo, J. Lee, and H. Cha, "A study on high-efficiency MPPT algorithm based on P&O method with variable step size," *2018 KIPE Power Electronics Annual Conference*, pp. 120-122, Jul. 2018.



### 김봉석(金棒奭)

1974년 4월 3일생. 2001년 광운대 전기공학과 졸업. 2003년 포항공대 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 2003년 LG전자 디지털 어플라이언스연구소 연구원. 2004년~현재 전력연구원 선임연구원.



### 정가준(丁嘉俊)

1994년 7월 30일생. 2016년 소주대(중국) 전기 및 자동화 학과 졸업. 2018년 충남대 전기공학과 졸업(석사). 2018년~현재 Shanghai KeLiang Information Tech&Eng 연구원.



### 심우식(沈宇植)

1993년 2월 27일생. 2018년 한밭대 전자-제어공학과 졸업. 2018년~현재 충남대 전기공학과 석사과정.



### **조종민(趙鍾珉)**

1987년 4월 1일생. 2013년 충남대 전기공학과 졸업. 2015년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2015년 ~ 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.



### **차한주(車翰周)**

1988년 서울대 전기공학과 졸업. 1990년 포항공대 전자전기공학과 졸업(석사). 2004년 미국 Texas A&M University, College station(공박). 1990년 ~ 2001년 LG산전연구소 책임연구원. 2009년 미국 United Technology Research Center 방문교수. 2005년 ~ 현재 충남대 전기공학과 교수. 당 학회 총무이사.